Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 331-342

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۳۴۲-۳۳۱

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی تأثیر امواج فراصوت بر نیروی شکست و کیفیت مغزشدگی گردو با استفاده از روش منحنی سطح پاسخ

ابراهیم بیابانی اقدم[۱]، محمدهادی خوش تقاضا[۲*]، غلامحسن نجفی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۴

چکیده

یکی از مهم‌ترین مراحل پس از برداشت گردو، شکستن پوسته سخت آن برای استحصال مغز گردوی سالم است. در این تحقیق از روش سطح پاسخ به‌منظور بررسی تأثیر فاکتورهای دمای حمام فراصوت (۲۰، ۳۵ و ۵۰ درجه سلسیوس) و مدت زمان فراصوت (۵، ۱۵ و ۲۵ دقیقه) همچنین نحوه اعمال نیروی شکست (سرعت و جهت بارگذاری) روی کیفیت مغز شدگی گردو استفاده شد. در نهایت بهینه‌سازی فاکتورهای تاثیرگذار بر مغزشدگی گردو مورد بررسی قرار گرفت. شکستن پوسته گردو توسط دستگاه آزمون مواد در سرعت‌های بارگذاری ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه در جهت طولی و عرضی انجام شد. نتایج نشان داد اعمال فراصوت در همه‌ی حالات، کیفیت مغزشدگی را افزایش و نیروی شکست را کاهش می‌دهد. همچنین مشاهده شد با افزایش سرعت بارگذاری و مدت زمان اعمال فراصوت درصد مغزهای سالم و درجه کیفیت مغزهای شکسته افزایش یافت. بالاترین کیفیت مغزشدگی و کم‌ترین نیروی شکست گردو در سرعت بارگذاری ۱/۵ mm s^{-1}، زمان اعمال فراصوت ۲۵ min، دمای ۵۰°C حمام فراصوت و در جهت بارگذاری طولی به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: حمام فراصوت، سرعت و جهت بارگذاری، شکستن گردو

مقدمه

گردو با نام علمی (*Juglans Regia*) میوه‌ای غنی از نظر اسیدهای چرب غیراشباع، پروتئین‌ها، ویتامین‌های E و A، مواد معدنی مثل فسفر، پتاسیم و آهن و مواد پکتینی می‌باشد (Colarič *et al.*, 2006). در بین کشورهای تولیدکننده گردو، ایران در مکان سوم قرار دارد. سطح زیر کشت گردو در کشور حدود ۱۵۰ هزار هکتار و میزان تولید ۴۵۰ هزار تن در سال است (FAO, 2014).

اطلاع از خواص مکانیکی و فاکتورهای مؤثر در گسیختگی محصولات کشاورزی برای مدل‌سازی و طراحی سیستم‌های خردکن و ماشین‌های خرمن‌کوبی، فرآوری، ذخیره‌سازی، آسیاب کردن، حمل‌ونقل، درجه‌بندی، تمیز کردن و جداسازی اهمیت دارد (Mohapatra and Bal, 2007). به‌منظور کسب نتایج مفید از آزمایش‌ها به‌صورت اطلاعات قابل‌استفاده در طراحی مهندسی، مطالعه بر روی رفتار منحنی نیرو- تغییر شکل محصولات کشاورزی حاصل از آزمون فشاری ضروری است (Tibäck *et al.*, 2014).

یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل پس از برداشت گردو، شکستن پوسته سخت آن برای استحصال مغز گردو است. نیروی لازم برای شکستگی گردو معیار مناسبی برای طراحی با کارایی بالا و کیفیت بهتر سیستم‌های پس از برداشت و فرآوری این محصول می‌باشد. هرچه این مقدار نیرو کمتر باشد با صرف انرژی کمتر می‌توان مغز شدگی را انجام داد.

تحقیقات نشان داده است که امواج فراصوت به‌صورت بالقوه روی خواص مکانیکی محصولات تأثیر می‌گذارد. در پژوهشی نشان داده شد که امواج فراصوت بر خواص مکانیکی توت‌فرنگی مؤثر بوده و افزایش فرکانس باعث سفتی بافت، حفظ کیفیت و کاهش گندیدگی آن شده است (Cao *et al.*, 2010). استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان یک فناوری نوین غیر حرارتی در شکستن خواب بذر می‌باشد که تأثیرات مکانیکی روی غشاء سلولی گذاشته و پوسته بذر را نفوذپذیرمی‌کند و در نتیجه جوانه‌زنی و خروج گیاهچه از پوسته تسهیل می‌شود (Yaldagard *et al.*, 2008).

در تحقیقی بر کیفیت مغزشدگی فندق مشاهده شد در بارگذاری عرضی فندق با نیروی کمتری می‌شکنند و در سرعت‌های بارگذاری کمتر از ۱ mm s^{-1} کمترین درصد مغزهای شکسته حاصل گشت (Kacal and Koyuncu, 2017). در تحقیقی دیگر روی ژنوتیپ‌های گوناگون گردو مشخص شد با افزایش جرم میوه و کاهش ضخامت پوسته، درصد مغزهای استخراجی سالم بهتر می‌شود (Bayazİt *et*

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس
(*-نویسنده مسئول: Email: khoshtag@modares.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v11i2.80096

al., 2009). در پژوهشی، مغزشدگی گردو تحت بار ضربه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش میزان رطوبت درصد مغزهای سالم و درجه کیفیت مغزهای شکسته را افزایش داد. همچنین کمترین خردشدگی مغز وقتی به‌دست آمد که گردوها سه ساعت داخل آب خیسانده شدند و بارگذاری در راستای عرضی انجام شد (Mohammadi Ghermezgholi *et al*., 2014). در تحقیقی پارامترهای شکستگی گردو (*Yalova-3*) بررسی شد و نتایج نشان داد یک رابطه معکوس بین ضخامت پوسته و کیفیت مغزشدگی وجود دارد. بهترین مغزشدگی (کمترین خردشدگی) گردو زمانی بود که نیرو در راستای طولی گردو وارد شد (Koyuncu *et al*., 2004). در سایر تحقیقات ثابت شده است که کیفیت مغزشدگی به رطوبت پوسته، اندازه مغز، ضخامت پوسته و جهت بارگذاری بستگی دارد (Özdemir and Özilgen, 1997; Tang *et al*., 1982). تحقیقاتی نیز در مورد تأثیر سرعت بارگذاری و رطوبت پوسته و جهت بارگذاری بر خواص مکانیکی گردو صورت گرفته است (Altuntas and Erkol, 2009; Kabas and Vladut, 2015).

هرچند که پژوهش‌هایی در مورد بارگذاری فشاری روی گردو در اثر بار ضربه‌ای انجام شده است، با این وجود تحقیقی در زمینه‌ی تأثیر امواج فراصوت بر مغز شدگی گردو گزارش نشده است. لذا هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثر فاکتورهای امواج فراصوت (دمای حمام فراصوت و مدت زمان فراصوت) و نحوه اعمال نیرو (سرعت و جهت بارگذاری) بر مغزشدگی گردو و بهینه‌سازی فاکتورهای فراصوت به روش سطح پاسخ بوده است.

مواد و روش‌ها

گردوی کاغذی برداشت شده از یکی از باغات الموت قزوین که جزو مرغوب‌ترین گردوهای ایران است، برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد. قبل از شروع آزمایش‌ها و اعمال تیمار فراصوت، گردوهای دارای شکل غیرطبیعی و معایب فیزیکی، حذف‌شده و نمونه‌های سالم و یکنواخت که دارای قطر متوسط هندسی ۳۸-۳۷ میلی‌متر بودند، برای تمام آزمایش‌ها استفاده شدند. طول (L)، عرض (W) و ضخامت (T) گردو توسط کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ mm اندازه‌گیری شد. میانگین قطر هندسی (D_g) گردو از رابطه (۱) محاسبه شد (Mohsenin, 1986).

$$D_g = LWT^{(1/3)} \qquad (۱)$$

قبل از انجام آزمایش‌ها، تعداد ۱۰ نمونه از گردوها (۱۱ تا ۱۳ گرم) به‌طور تصادفی انتخاب و در دمای ۱۰۵°C و به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون قرار گرفتند و بر اساس روش استاندارد وزنی، مقدار رطوبت اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (Braga *et al*., 1999). رطوبت اولیه محصول ۵/۵ درصد بر پایه‌تر به‌دست آمد.

اعمال فراصوت

برای اعمال فراصوت از یک دستگاه حمام فراصوت (D-78224 Singen/htw, Elma, Germany) استفاده شد که قادر به تولید امواج فراصوت با فرکانس ۵۰kHz و توان ۱۰۰۰W بود. برای محصولات کشاورزی، دامنه فرکانس بین ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز در نظرگرفته می‌شود (Kek *et al*., 2013). بر اساس تحقیقات گذشته برای سایر محصولات (Cao *et al*., 2010; Entezari *et al*., 2004) و همچنین پیش آزمایش‌ها انجام گرفته، امواج فراصوت در دماهای (۲۰، ۳۵ و ۵۰ درجه سلسیوس) و زمان‌های (۵، ۱۵ و ۲۵ دقیقه) بر گردوهایی که در آب مقطر قرار داشتند، اعمال گردید. ارتفاع آب در داخل محفظه‌ی حمام فراصوت طوری بود که همه‌ی نمونه‌ها تحت تأثیر امواج فراصوت قرار گرفتند. به دلیل کمتر بودن چگالی گردو نسبت به آب، گردوها روی آب می‌ماندند، برای حل این مشکل و تأثیر همگون امواج فراصوت بر محصول از یک ظرف توری در داخل محفظه استفاده شد (شکل ۱). رطوبت نمونه‌ها بعد از اعمال فراصوت به ۸/۸ درصد بر پایه‌تر رسید. گردوهای تر برای بازگشت به رطوبت اولیه خود در آون در دمای ۴۵ °C خشک شدند تا به وزن اولیه نمونه قبل از فراصوت برسد.

بارگذاری شبه‌استاتیک برای شکست گردو

برای تعیین خواص مکانیکی و در نهایت شکست گردو از دستگاه آزمون مواد (k-SH50, Hunsfield, England) با دو فک تخت که روی نمونه قرار می‌گیرد، استفاده شد. گردوها بعد از اعمال فراصوت در سرعت‌های بارگذاری ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه در جهت طولی (شکل ۲) و عرضی بارگذاری شدند. بارگذاری تا ۳۰ درصد ارتفاع محصول (هم در جهت طولی و هم در جهت عرضی) برای انتخاب نقطه بهینه جهت شکست و توقف فشرده‌سازی، ادامه یافت (Koyuncu *et al*., 2004). در همه آزمون‌های بارگذاری نخستین نقطه شکست به‌عنوان نیروی شکست ثبت گردید.

اندازه‌گیری کیفیت مغزشدگی گردو

در این تحقیق بعد از شکستن گردو کیفیت مغز شدگی برحسب تعداد تکه‌های مغز خردشده و اندازه مغز مطابق جدول ۱ تعیین شد (Mohammadi Ghermezgholi *et al*., 2014).



شکل ۱– اعمال امواج فراصوت بر نمونه گردوها
Fig.1. Ultrasound waves exertion on walnut samples



شکل ۲– بارگذاری طولی گردو
Fig.2. Longitudinal loading of walnut

تجزیه و تحلیل آماری و بهینه‌سازی

از روش سطح پاسخ برای تحلیل آماری و بهینه‌سازی استفاده شد. برای این منظور از نرم‌افزار Design Expert 7 استفاده گردید. مهم‌ترین مسئله این تحقیق بررسی اثرات اصلی و متقابل فاکتورها و به‌دست آوردن نقطه بهینه فاکتورها به‌منظور بهترین مغزشدگی گردو بود. طرح مورد استفاده در روش سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی[1] بود که بیشترین کاربرد در میان طرح‌های روش سطح پاسخ را دارد. در این مطالعه اثر متغیرهای مستقل x_1 (سرعت بارگذاری)، x_2 (دمای حمام فراصوت) و x_3 (زمان اعمال فراصوت) هر کدام در سه سطح و x_4 (جهت بارگذاری) و x_5 (میزان رطوبت) هر کدام در دو سطح مورد ارزیابی قرار گرفت که در جدول ۲ نشان داده شده است. تعداد ۸۰ آزمایش برای بهینه‌سازی نیروی شکست انجام شد که از این بین ۶ آزمایش به‌عنوان نقطه مرکزی توسط نرم‌افزار انتخاب‌شده بود. هدف از تکرار آزمایش نقاط مرکزی، تخمین، ارزیابی خطای آزمایش‌ها و اندازه‌گیری ضعف برازش[2] می‌باشد (Bezerra *et al*., 2008).

جدا کردن اثر آب در نقطه بهینه آزمایش

بعد از بهینه‌سازی شرایط تیمار فراصوت به‌دلیل این‌که فرآیند در آب صورت گرفته است، به‌منظور جدا کردن اثر آب بر کیفیت مغزشدگی و نیروی شکست، گردوها در آب مطابق با دما و زمان قرارگیری تحت شرایط بهینه فراصوت خیسانده شده و سپس نمونه خیسانده شده (در آب خیس شده، اما تحت امواج فراصوت قرار نگرفته است) و نمونه شاهد (خشک بدون اعمال فراصوت) توسط دستگاه آزمون مواد بارگذاری شدند.

1- Central composite design

2- Lack of fit

جدول ۱- ارزیابی کیفیت مغزشدگی گردو

Table 1- Evaluation of walnut kernel extraction quality

مغزشدگی **Kernel extraction**	درجه **Grade**
دو نصفه مغز Two half kernel	100
یک نصفه مغز و دوتکه یک‌چهارم مغز One half kernel and two pieces of quarter kernel	80
یک نصفه مغز، یک‌تکه یک‌چهارم مغز و دوتکه یک‌هشتم مغز One half kernel, a piece of quarter kernel and two pieces of one-eighth of kernel	60
یک نصفه مغز و چهار تکه یک‌هشتم مغز One half kernel and four pieces of one-eighth of kernel	50
چهار تکه یک‌چهارم مغز Four pieces of quarter kernel	40
سه‌تکه یک‌چهارم و دوتکه یک‌هشتم Three pieces of quarter kernel and two pieces of one-eighth kernel	30
دوتکه یک‌چهارم مغز و چهار تکه یک‌هشتم مغز Two pieces of quarter kernel and four pieces of one-eighth kernel	20
۷ تکه و بیشتر 7 pieces and more	10
گردویی که شکسته نشده و ترک جزئی دارد Walnut which not broken and has minor crack	0

جدول ۲- متغیرهای مستقل و سطوح فاکتور

Table 2- Independent variables and their levels

متغیرهای مستقل **Independent variables**	نماد ریاضی **Mathematical symbol**	سطح فاکتور **Factor level**		
		−1	0	+1
سرعت بارگذاری ($mm.s^{-1}$) Loading speed	x_1	0.5	1.5	2.5
دمافراصوت (°C) Ultrasound bath temperature	x_2	20	35	50
زمان فراصوت (min) Ultrasound time duration	x_3	5	15	25

نتایج و بحث

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس را نشان می‌دهد. چهار اثر اصلی سرعت و جهت بارگذاری، زمان اعمال فراصوت و رطوبت در سطح احتمال ۱٪ و اثر اصلی دمای حمام فراصوت در سطح ۵٪ برای کیفیت مغزشدگی و نیروی شکست معنی‌دار بود. هم‌چنین نتایج نشان داد اثر متقابل سرعت و جهت بارگذاری در سطح احتمال ۱٪ و اثر متقابل زمان فراصوت و جهت بارگذاری، زمان و رطوبت در سطح ۵٪ برای کیفیت مغزشدگی معنی‌دار بود. با توجه به مقادیر مجموع مربعات فاکتور جهت بارگذاری، بیشترین تأثیر در کیفیت مغز شدگی به خود اختصاص داده است که این امر نشان‌دهنده اهمیت بیشتر این عامل نسبت به چهار فاکتور مستقل دیگر است (جدول ۲). هم‌چنین اثر متقابل سرعت بارگذاری و جهت بارگذاری، دما و جهت بارگذاری در سطح احتمال ۵٪ برای نیرو شکست گردو معنی‌دار بوده است.

پس از حذف ضرایب غیر معنی‌دار با توجه به جدول ۲ از مدل اولیه مدل نهایی به‌صورت رابطه (۲) برای کیفیت مغزشدگی با R^2= ۰/۹۳۳۷ به‌صورت رابطه (۳) برای نیروی شکست گردو با R^2= ۰/۸۳ حاصل گردید:

$$Y=54+11.50x_1-3x_2+2.5x_3-23.75x_4-6.75x_5-5.5x_1x_4-2.35x_4x_5-4.5x_1^2 \quad (۲)$$

$$Y= 75.97+4.48x_1-1.57x_2-8.04x_3-3.44x_4+2.2x_5+1.88x_1x_4+1.49x_3x_4+8.22x_1^2 \quad (۳)$$

مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی‌شده، نشان داد مدل درجه دوم کیفیت مغزشدگی و نیروی شکست گردو را با ضریب تعیین مناسبی تخمین زده است (شکل ۳ و ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس کیفیت مغزشدگی و نیروی شکست گردو

Table 3- Analysis of variance (ANOVA) for the walnut kernel extraction quality and rupture force

منابع تغییرات Source	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of squares نیروی شکست (N) Rupture force	 کیفیت مغزشدگی Kernel extraction quality
مدل Model	18	6562.98**	57211.65**
x_1	1	800.51**	5290**
x_2	1	101.04*	360*
x_3	1	2582.51**	250*
x_4	1	944.13**	45125*
x_5	1	385.02**	3645*
x_1x_2	1	31.88 ^{ns}	78.13 ^{ns}
x_1x_3	1	12.44 ^{ns}	28.13 ^{ns}
x_1x_4	1	142.07*	1210**
x_1x_5	1	11 ^{ns}	160 ^{ns}
x_2x_3	1	1.91 ^{ns}	28.13 ^{ns}
x_2x_4	1	1.18 ^{ns}	10 ^{ns}
x_2x_5	1	8.3 ^{ns}	160 ^{ns}
x_3x_4	1	88.32*	0 ^{ns}
x_3x_5	1	4.43 ^{ns}	10 ^{ns}
x_4x_5	1	66.24 ^{ns}	405*
x_1^2	1	659.82**	327*
x_2^2	1	10.06 ^{ns}	27.3*
x_3^2	1	32.97 ^{ns}	75.46*
باقی‌مانده Residual	61	21.68	3543.35
عدم برازش Lack of fit	41	21.73 ^{ns}	2043.35 ^{ns}
خطا Error	20	21.58	1500

^{ns} عدم وجود اختلاف معنی‌داری، * معنی‌داری در سطح ۵٪ و ** معنی‌داری در سطح ۱٪

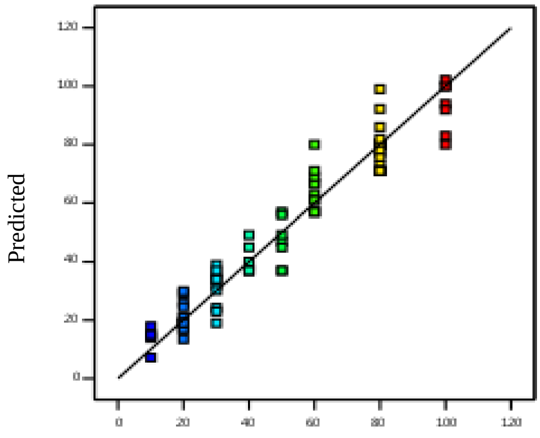
^{ns} not significant, * significant at 5% level and ** significant at 1% level

x_1 (سرعت بارگذاری)، x_2 (دمای حمام فراصوت)، x_3 (زمان اعمال فراصوت)، x_4 (جهت بارگذاری) و x_5 (میزان رطوبت)

x_1 (Loading speed), x_2 (Ultrasound bath temperature), x_3 (Ultrasound time duration), x_4 (Loading direction), x_5 (Moisture content)

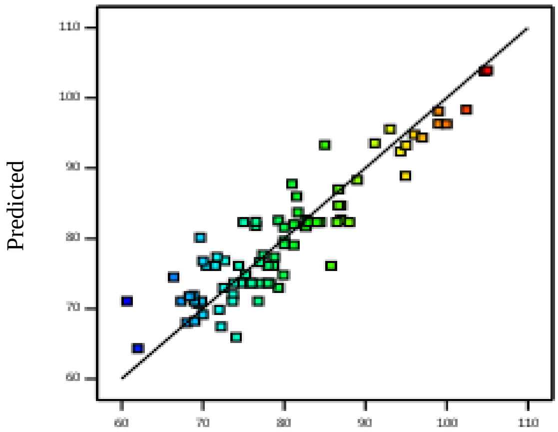
تاثیر فاکتورهای اصلی فراصوت بر نیروی شکست و کیفیت مغزشدگی گردو

با افزایش مدت زمان اعمال فراصوت از ۵ به ۲۵ دقیقه، درصد مغزهای شکسته کاهش و درصد مغزهای سالم و درجه کیفیت مغزهای شکسته افزایش‌یافته است (شکل ۵-الف). همچنین با کاهش دمای اعمال فراصوت از ۵۰ به ۲۰ درجه سلسیوس درصد مغزهای سالم بیشتر شده است (شکل ۵-ب). این نتیجه با نتایج تحقیق بر روی گردو که نشان داد افزایش میزان رطوبت، درصد مغزهای سالم و درجه کیفیت مغزهای شکسته را افزایش داد (Koyuncu *et al.*, 2004)، مطابقت داشت. همچنین با افزایش دمای اعمال فراصوت از ۲۰ به ۵۰ درجه سلسیوس، درصد مغزهای سالم کاهش یافته است. با افزایش دما حمام فراصوت، حرکت مولکولی در پدیده حفره‌زایی افزایش می‌یابد (Povey and Mason, 1998; Zhang *et al.*, 2017) به‌طوری‌که نیروی برشی ایجادشده در اثر پدیده حفره زایی که دیواره‌های سلول را به‌صورت مکانیکی می‌شکند و محتویات آن را رها می‌سازد و بافت نمونه را نرم‌تر می‌کند، به احتمال قوی با نرم شدن مغز گرده حساسیت به شکستگی آن افزایش در نتیجه کیفیت مغزشدگی کاهش می‌یابد.



شکل ۳- مقایسه کیفیت مغز شدگی داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های مدل درجه دوم (رابطه ۲)

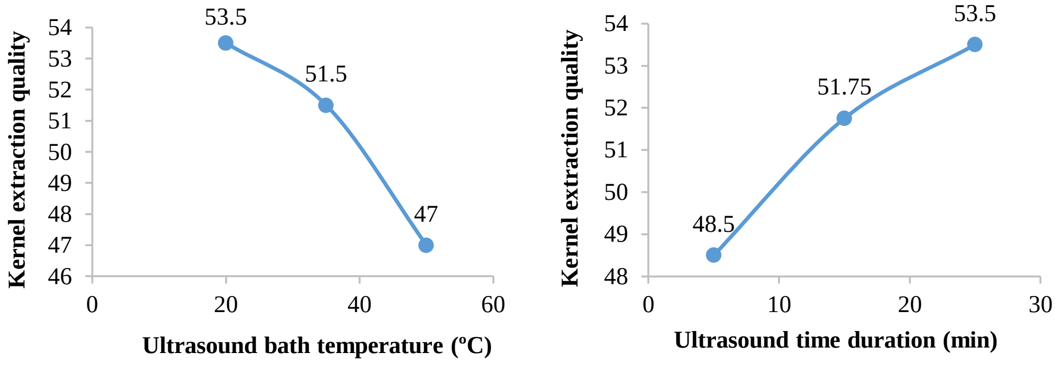
Fig.3. Compare of experimental data with the quadratic model data for kernel extraction quality (Eq. 2)



شکل ٤- مقایسه نیروی شکست داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های مدل درجه دوم (رابطه ۳)

Fig.4. Compare of experimental data with the quadratic model data for rupture force (Eq.3)

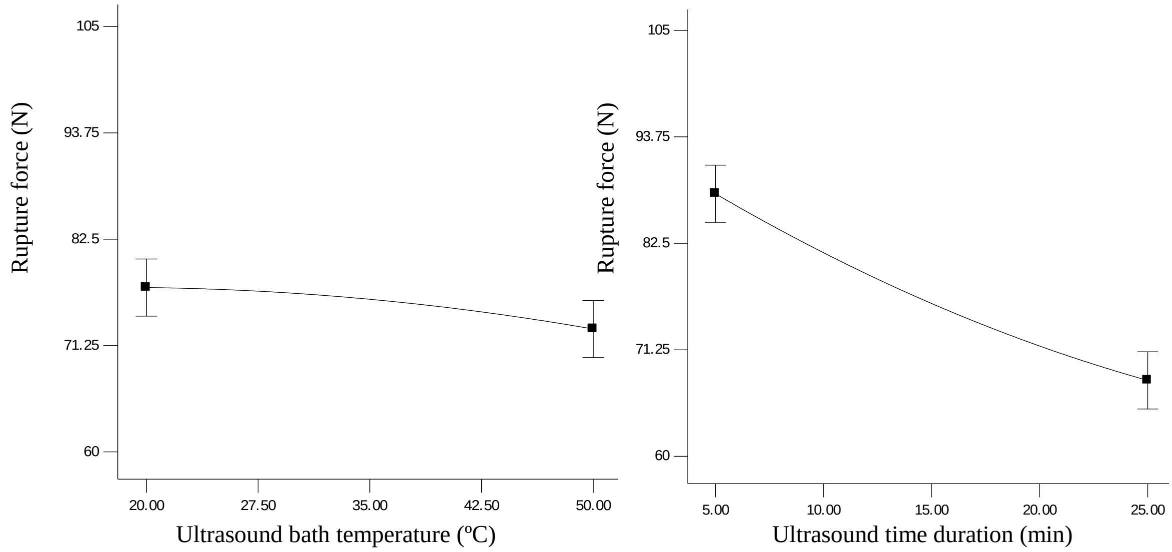
شکل ۶ اثر تغییرات زمان اعمال فراصوت و دمای حمام فراصوت روی نیروی شکست گردو را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان اعمال فراصوت از ۵ به ۲۵ دقیقه، نیروی شکست گردو با شیب زیاد از ۸۷ به ۶۸ نیوتن کاهش می‌یابد و با افزایش دمای اعمال فراصوت از ۲۰ به ۵۰ درجه سلسیوس، نیروی شکست با شیب خیلی کم از ۷۷ به ۷۳ نیوتن کاهش یافت. با توجه به این‌که علامت زمان اعمال فراصوت و دمای حمام در معادله نیروی شکست منفی است (رابطه ۳)، افزایش مقادیر هر یک از این متغیرها باعث کاهش نیروی شکست خواهد شد. ضریب رگرسیونی زمان بیشتر از دمای حمام فراصوت است، لذا تأثیر زمان اعمال فراصوت بر نیروی شکست گردو بیشتر از دمای حمام بوده است. مکانیسم اصلی استفاده از امواج فراصوت به پدیده حفره‌زایی (کاویتاسیون) مربوط می‌شود که تأثیرات مکانیکی روی غشاء سلولی گذاشته و دیواره‌های سلول را به‌صورت مکانیکی می‌شکند و بافت نمونه را نرم‌تر می‌کند (Verhaagen and Fernandez Rivas, 2016). این نتیجه با تحقیقی روی تأثیر امواج فراصوت بر جوانه‌زنی گیاهان که نشان داد امواج فراصوت جوانه‌زنی و خروج گیاهچه از پوسته را تسهیل می بخشد (Yaldagard *et al.*, 2008) مطابقت دارد.



(الف) (ب)

شکل ۵– مقادیر میانگین کیفیت مغز گردو در (الف) زمان‌های مختلف فراصوت و (ب) دماهای مختلف فراصوت

Fig.5. Mean values of kernel extraction quality at (a) different ultrasound time duration and (b) different ultrasound bath temperature



(الف) (ب)

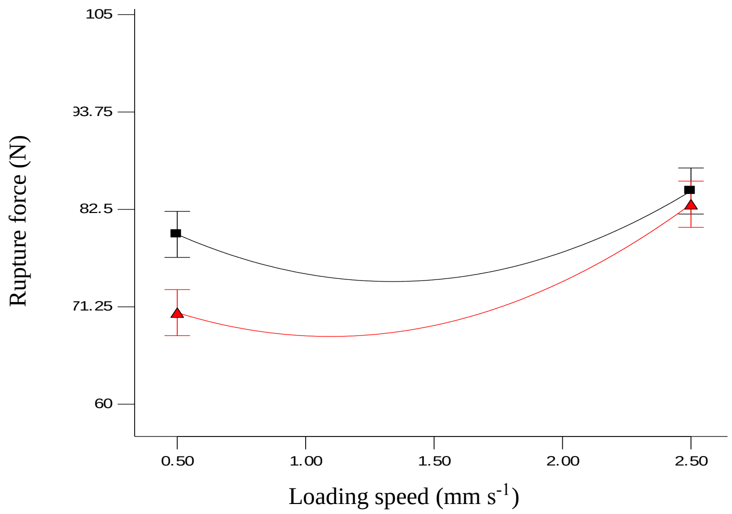
شکل ٦- مقادیر میانگین نیروی شکست در (الف) زمان‌های مختلف فراصوت و (ب) دماهای مختلف فراصوت

Fig.6. Mean values of rupture force at (a) different ultrasound time duration and (b) different ultrasound bath temperature

اثر متقابل فاکتورها بر نیروی شکست و کیفیت مغزشدگی گردو

شکل ۷، تأثیر هم‌زمان دو عامل سرعت بارگذاری و جهت بارگذاری بر نیروی شکست گردو در شرایطی که بقیه عوامل مستقل در نقطه مرکزی قرارگرفته‌اند را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ به ۱/۵ میلی‌متر بر ثانیه در هر دو جهت بارگذاری طولی و عرضی مقدار نیروی شکست کاهش یافته است. با افزایش سرعت بارگذاری از ۱/۵ به ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه در هردو جهت بارگذاری طولی و عرضی مقدار نیروی شکست افزایش یافته است. این پدیده در بیشتر مواد بیولوژیک مشاهده شده که با افزایش سرعت بارگذاری، مواد از خود رفتار سختی نشان می‌دهند. برای مثال در تحقیقی روی خواص مکانیکی گردو در سرعت‌های بارگذاری ۵۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، نیروی شکست گردو با افزایش سرعت بارگذاری افزایش پیدا کرد (Sharifian and Derafshi, 2008). همچنین در جهت بارگذاری طولی نیروی شکست بیشتر از جهت بارگذاری عرضی بوده است. لذا کمترین نیروی شکست گردو در سرعت بارگذاری ۱/۵ میلی‌متر بر ثانیه در جهت بارگذاری عرضی به‌دست آمد. شکل ۸ نمودار مربوط به اثر هم‌زمان دو عامل زمان فراصوت و جهت بارگذاری بر نیروی

شکست گردو در شرایطی که بقیه عوامل مستقل در نقطه مرکزی قرارگرفته‌اند را نشان می‌دهد. مشخص است با افزایش زمان بارگذاری در هر دو جهت بارگذاری مقدار نیروی شکست کاهش می‌یابد به‌طوری‌که کمترین نیروی شکست در جهت بارگذاری عرضی و در زمان اعمال فراصوت ۵ min برابر ۶۵ N محاسبه شد.

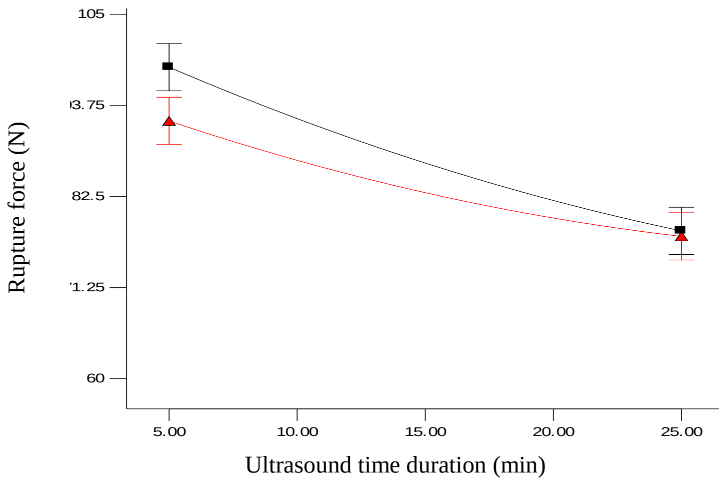


شکل ۷– اثر متقابل سرعت بارگذاری و جهت بارگذاری بر نیروی شکست گردو

(■ بارگذاری طولی، ▲ بارگذاری عرضی)

Fig.7. Interaction effect of loading speed and loading direction on rupture force of walnut

(■ Longitudinal loading, ▲ Latitudinal loading)



شکل ۸– اثر متقابل زمان اعمال فراصوت و جهت بارگذاری بر نیروی شکست گردو

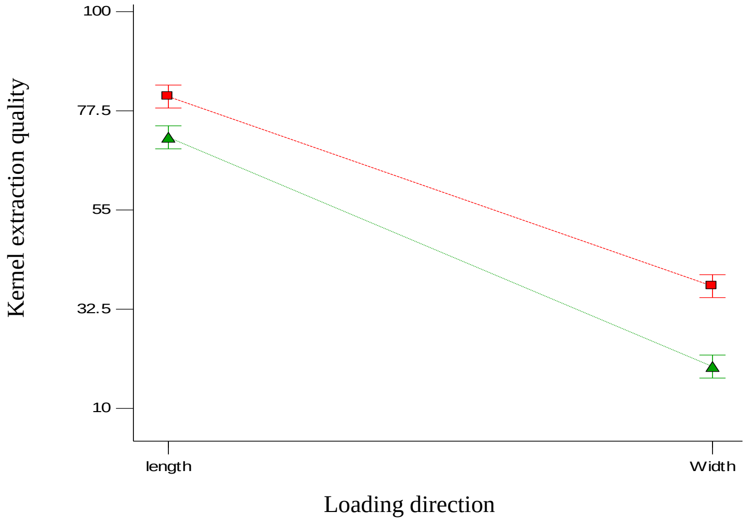
(■ بارگذاری طولی، ▲ بارگذاری عرضی)

Fig.8. Interaction effect of ultrasound time duration and loading direction on rupture force of walnut

(■ Longitudinal loading, ▲ Latitudinal loading)

شکل ۹ اثر دو عامل جهت بارگذاری و رطوبت بر کیفیت مغزشدگی گردو را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود گردوهای تر در هر دو جهت بارگذاری، کیفیت مغزشدگی بهتری دارند که با نتایج تحقیقی بر ارزیابی کیفیت (خردشدگی) مغز حاصل از شکستن گردو تحت بار ضربه‌ای (Mohammadi Ghermezgholi *et al.*, 2014)، همسو است. با خشک شدن مغز گردو، حساسیت به ضربه و خردشدگی گردو بیشتر می‌شود، در نتیجه کیفیت مغزشدگی آن کاهش می‌یابد. به همین دلیل مغزهای سالم بیشتری در نمونه با محتوای رطوبتی بالا مشاهده گردید. در جهت بارگذاری طولی درصد

مغزهای سالم بیشتری حاصل شد و بیشترین خردشدگی در گردوهای خشک و جهت بارگذاری عرضی به‌دست آمد.



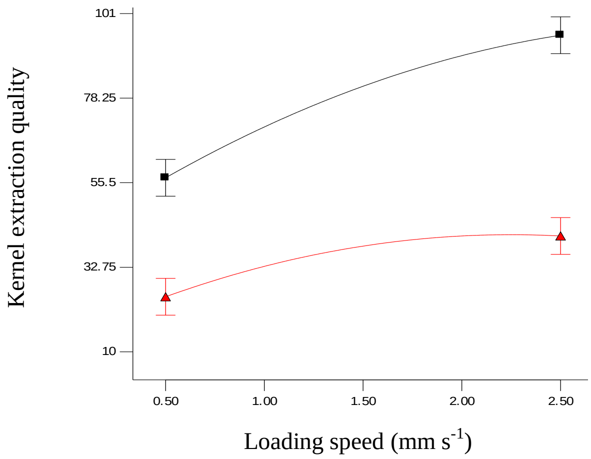
شکل ۹- اثر متقابل جهت بارگذاری و رطوبت محصول بر کیفیت مغز شدگی گردو

(■گردوی تر، ▲ گردوی خشک)

Fig.9. Interaction effect of loading direction and moisture content on kernel extraction quality of walnut

(■ Wet walnat, ▲ Dried walnat)

شکل ۱۰ اثر دو عامل سرعت بارگذاری و جهت بارگذاری بر کیفیت مغزشدگی گردو در شرایطی که بقیه عوامل مستقل در نقطه مرکزی قرارگرفته‌اند را نشان می‌دهد. مشخص است که شیب افزایش درجه کیفی در جهت طولی بیشتر از جهت عرضی است. همچنین نتایج نشان داد که بهترین کیفیت مغزشدگی (کمترین خردشدگی) زمانی است که نیروی شکست در راستای طول گردو وارد شده که نتایج به‌دست آمده با کار (Koyuncu *et al.*, 2004) مطابقت داشت.



شکل ۱۰- اثر متقابل سرعت بارگذاری و جهت بارگذاری بر کیفیت خروج مغزشدگی گردو

(■ بارگذاری طولی، ▲ بارگذاری عرضی)

Fig.10. Interaction effect of loading speed and loading direction on kernel extraction quality of walnut

(■ Longitudinal loading, ▲ Latitudinal loading)

بهینه‌سازی فرآیند تیمار فراصوت

از بخش Numerical Optimisation نرم‌افزار Design Expert برای یافتن نقطه بهینه عملکردی استفاده شد. به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند فراصوت اعمال شرایط مرزی متغیرهای مستقل در داخل محدوده تعیین شد. همچنین هرچه قدر مقدار نیروی شکست کمتر و کیفیت مغزشدگی بهتر باشد به همان اندازه مطلوبیت بهینه‌سازی افزایش می‌یابد. با استفاده از فناوری فراصوت، تلاش بر این بود تا مقدار نیروی شکست پوسته گردو کاهش پیداکرده و مغز

خارج‌شده کیفیت بهتری داشته باشد، لذا در نرم‌افزار سطح پاسخ بالاترین اهمیت (+++++) برای کمینه نیروی شکست و بیشینه کیفیت مغزشدگی انتخاب شد. مقدار نیروی شکست ۶۴/۴ N و مغزشدگی دو نصفه مغز در سرعت بارگذاری ۱/۳ $mm\ s^{-1}$ در مدت زمان ۲۵ min دقیقه در دمای ۵۰°C در جهت طولی برای گردوی تر به‌دست آمد. به‌منظور تسهیل در آزمایش، متغیرهای مستقل در حالت بهینه به نزدیک‌ترین عدد گرد شده و جواب به‌دست آمده برای ترکیب بهینه، به‌صورت تجربی با سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار نیروی شکست ۶۲ N و مغزشدگی دو نصفه مغز به‌دست آمد. نتایج آزمایش تجربی و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نشد که نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی بالای مدل ارائه شده است.

جدول ۴ نتایج مقادیر متوسط نیروی شکست و کیفیت مغزشدگی به‌دست آمده در تیمارهای شاهد (نمونه خام که در آب خیس نشده است)، خیسانده (در آب خیس شده در دما و زمان بهینه ولی بدون امواج فراصوت) و بهینه فراصوت (سرعت بارگذاری ۱/۳ $mm\ s^{-1}$ در مدت زمان ۲۵ min دقیقه در دمای ۵۰°C در جهت طولی برای گردوی تر) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین نیروی شکست و کیفیت مغزشدگی در نمونه‌های بهینه فراصوت و نمونه‌های شاهد و خیس شده، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ وجود دارد. اعمال فراصوت نیروی شکست گردو را کاهش داده و در همه‌ی حالات بهترین کیفیت مغزشدگی مربوط به تیمار فراصوت شده بود. همچنین اختلاف معنی‌داری در کیفیت مغزشدگی نمونه خیس شده نسبت به شاهد مشاهده نشد، ولی با این وجود خیس کردن گردو کیفیت مغزشدگی را افزایش داد. با توجه به این‌که اعمال نیرو در جهت طولی کمترین شکستگی مغز گردو را داشت، توجه به این نتایج در طراحی دستگاه‌های فرآوری و مغزکن گردو می‌تواند با صرف انرژی کمتر، کیفیت مغز شدگی را بهبود ببخشد.

جدول ٤- نتایج نیروی شکست و کیفیت مغزشدگی گردو در نمونه‌های شاهد، خیسانده و نقطه بهینه فراصوت

Table 4- Walnut kernel extraction quality and rupture force result in control, weted samples and ultrasonic optimal point

نمونه **Sample**	کیفیت مغزشدگی **Kernel extraction quality**	نیروی شکست **Rupture force**
شاهد Control	$50^{a}\pm5$	$159^{a}\pm7.62$
خیسانده Weted	$60^{a}\pm3.8$	$137^{b}\pm7.35$
فراصوت (نقطه بهینه) Ultrasonic (optimal point)	$100^{b}\pm0$	$62^{c}\pm4.18$

در هر ستون مقادیر با حروف غیر مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ با یکدیگر دارند.

In each column values assigned with different letters are significantly different (p= 0.05).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد در همه‌ی حالات بهترین کیفیت مغزشدگی و کم‌ترین نیروی شکست، مربوط به تیمار فراصوت شده بود. همچنین مشاهده شد با افزایش سرعت بارگذاری و مدت زمان اعمال فراصوت، درصد مغزهای سالم افزایش‌یافت. گردوهای فراصوت شده تر نسبت به خشک و جهت بارگذاری طولی نسبت به عرضی، کیفیت مغزشدگی بهتری داشتند. نقطه بهینه کیفیت مغزشدگی و نیروی شکست گردو در سرعت بارگذاری ۱/۳ $mm\ s^{-1}$، زمان اعمال فراصوت ۲۵ min، دمای ۵۰°C حمام فراصوت و در جهت بارگذاری طولی به‌دست آمد.

References

1. Altuntas, E., and M. Erkol. 2009. The Effects of Moisture Content, Compression Speeds, and Axes on Mechanical Properties of Walnut Cultivars. Food and Bioprocess Technology 4: 1288-1295.
2. Bayazİt, S., C. Toplu, and O. Calışkan. 2009. Yield and fruit characteristics of some walnut (*Juglans regia* L.) varieties in Yayladağı (Hatay) ecological conditions. Ziraat Fakultesi Dergisi, Mustafa Kemal Universitesi 14: 33-40.
3. Bezerra, M. A., R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escaleira. 2008. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. Talanta 76: 965-977.
4. Braga, G. C., S. M. Couto, T. Hara, and J. T. P. Almeida Neto. 1999. Mechanical Behaviour of Macadamia Nut under Compression Loading. Journal of Agricultural Engineering Research 72: 239-245.
5. Cao, S., Z. Hu, B. Pang, H. Wang, H. Xie, and F. Wu. 2010. Effect of ultrasound treatment on fruit decay and quality maintenance in strawberry after harvest. Food Control 21: 529-532.

6. Entezari, M. H., S. Hagh Nazary, and M. H. Haddad Khodaparast. 2004. The direct effect of ultrasound on the extraction of date syrup and its micro-organisms. Ultrason Sonochem 11: 379-384.
7. FAO. 2014. Statistical DatabaseFood and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division. http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx.
8. Kabas, O., and V. Vladut. 2015. Determination of Some Engineering Properties of Pecan (*Carya illinoinensis*) for New Design of Cracking System. Erwerbs-Obstbau 58: 31-39.
9. Kacal, M., and M. A. Koyuncu. 2017 .Cracking characteristics and kernel extraction quality of hazelnuts: Effects of compression speed and positions. International Journal of Food Properties: 1-11.
10. Kek, S. P., N. L. Chin, and Y. A. Yusof. 2013. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. Food and Bioproducts Processing 91: 495-506.
11. Koyuncu, M. A., K. Ekinci, and E. Savran. 2004. Cracking Characteristics of Walnut. Biosystems Engineering 87: 305-311.
12. Mohammadi Ghermezgholi, K., H. R. Ghassemzadeh, H. Navid, M. Moghaddam, and H. Ghaffari. 2014. Evaluation of Walnut Kernel Quality (as Degree of Crushing) Obtained Under Impact Loading. Journal of Agricultural Machinery 4: 11-20. (In Farsi).
13. Mohapatra, D., and S. Bal. 2007. Effect of degree of milling on specific energy consumption, optical measurements and cooking quality of rice. Journal of Food Engineering 80: 119-125.
14. Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Report no.
15. Özdemir, M., and M. Özilgen. 1997 .Comparison of the quality of hazelnuts unshelled with different sizing and cracking systems. Journal of Agricultural Engineering Research 67: 219-227.
16. Povey, M. J., and T. J. Mason. 1998. Ultrasound in food processing. Springer Science & Business Media.
17. Sharifian, F., and M. H. Derafshi. 2008. Mechanical behavior of walnut under cracking conditions. Journal of Applied Sciences 8: 886-890.
18. Tang, G., T. Liang, and F. Munchmeyer. 1982. A variable deformation macadamia nut cracker. Transactions of the ASAE 25: 1506-1511.
19. Tibäck, E., M. Langton, J. Oliveira, and L. Ahrné. 2014. Mathematical modeling of the viscosity of tomato, broccoli and carrot purees under dynamic conditions. Journal of Food Engineering 124: 35-42.
20. Verhaagen, B., and D. Fernandez Rivas. 2016. Measuring cavitation and its cleaning effect. Ultrason Sonochem 29: 619-628.
21. Yaldagard, M., S. A. Mortazavi, and F. Tabatabaie. 2008. Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barley seed :Optimization of method by the Taguchi approach. Journal of the Institute of Brewing 114: 14-21.
22. Zhang, L., C. Zhou, B. Wang, A. E. A. Yagoub, H. Ma, X. Zhang, and M. Wu. 2017. Study of ultrasonic cavitation during extraction of the peanut oil at varying frequencies. Ultrason Sonochem 37: 106-113.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 331-342

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۳۴۲-۳۳۱

Optimization Effect of Ultrasound on Rupture Force and Kernel Extracting Quality of Walnut using Response Surface Method (RSM)

E. Biabani Agdam[1], M. H. Khoshtaghaza[2*], Gh. Najafi[3]

Received: 15-04-2019
Accepted: 04-03-2020

Introduction

One of the most important and sensitive steps after walnut harvesting is the separation of the kernel from its shell. Walnut rupture force is an appropriate criterion for design with high performance and better quality, which can be used as the basis for designing and adjusting the various parts of machines that are in contact with walnut. The lower rupture force caused the less energy requirement to separate the walnut kernel from the shell. The use of ultrasound in ambient fluids is well known to cause turbulence and biological cell rupture. These effects arise principally from the phenomenon known as cavitation which can scour surfaces and damage cellular material. Therefore the object of this study is to find the effect of ultrasound factors on the amount of walnut rupture force and quality of kernel extraction.

Materials and Methods

Walnut paper variety was selected from a Qazvin province orchard for this study. To determine the initial moisture content of the nuts, the samples were dried in an oven at 105°C for 24 h. Initial moisture content was found 5.5 (%w.b). The ultrasounds bath system (D-78224 Singen/htw, Elma, Germany) was used with a nominal frequency of 50 kHz and power of 1000 W. In this research, based on the pretest results and previous studies (Cao *et al.*, 2010; Entezari *et al.*, 2004) walnut samples were treated with three ultrasound time duration (5, 10 and 15 min) and three ultrasound bath temperature (20, 35, and 50ºC). Moisture content of the walnuts after ultrasound treatment was 8.8 (%w.b). After the walnut samples were treated by ultrasonic factors, a material testing machine (H50 K-S, Hounsfield, England) was used to determine the rupture force of the walnuts. The walnut was placed between two plates, and loaded at three loading speeds (0.5, 1.5, and 2.5 mm s^{-1}) and pressed until the walnut ruptured. Rupture force was applied along with X and Y axes. The X-axis was in the longitudinal axis through the hilum to the tip (length) and the Y-axis was in the latitudinal axis (width) at right angles to the X-axis. Kernel extraction quality was classified into grades according to size and number of broken pieces of the kernel. Central composite design (CCD) of resound surface method was used to optimize the effect of ultrasonic factors on walnut kernel extraction.

Results and Discussion

The results indicated that the loading speed, ultrasound time duration, loading direction, and moisture content had a highly significant effect ($P<0.01$) and ultrasound bath temperature ($P<0.05$) on the rupture force and kernel extracting quality. Regarding the sum of squares of ANOVA results, the ultrasound time duration factor had the most effect on the rupture force and the loading direction factor had the most effect on kernel extraction quality. By increasing bath temperature and ultrasound time duration, walnut rupture force was decreased. The minimum walnut rupture force was obtained in 25 min ultrasound time duration, 50ºC bath temperature, 1.5 mm s^{-1} loading speed, and width loading direction for wet walnut. By increasing bath temperature, walnut kernel losses were increased. The best kernel extraction quality was obtained in 2.5 mm s^{-1} loading speed, 25 min ultrasound duration, 20ºC bath temperature, and longitudinal loading direction. The proposed optimal point was obtained at 64.4 N rupture force, and two half of the kernel at 1.3 mm s^{-1} loading speed, 25 min ultrasound duration, 50ºC bath temperature, and longitudinal loading direction for wet walnut.

Conclusions

The walnut ultrasound treated samples had minimum rupture force and the best quality kernel extraction. It was observed that by increasing the loading speed and ultrasound time duration, the percentage of whole kernels and the quality degree of broken kernels increased.

Keywords: Loading speed and direction, Ultrasound bath, Walnut rupture

1- PhD. Student, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University
2- Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University
3- Associate Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University
(*- Corresponding Author Email**:** khoshtag@modares.ac.ir)